

半導体・バイオ融合集積化技術の構築

実施予定期間：平成18年度～平成27年度

総括責任者：牟田 泰三（広島大学・学長）

協働機関：エルピーダメモリ（株）、（株）生体分子計測研究所

I. 概要

広島大学ではナノデバイス・システム研究センターを中核として19年間一貫してシリコンデバイスの微細化研究を続けてきた。同じ広島に本拠地を持つ日本最大の半導体メモリ会社エルピーダメモリ（株）とさらなる微細化と新原理探索に挑戦し、現在の1000倍の高密度を有するテラビットメモリを開発する。さらにこのデバイス技術をバイオ分野に広げるために、分子生命機能科学専攻の研究グループ、（株）生体分子計測研究所とともにシリコンナノデバイス上で微小生命体やバイオ分子の多検体高速診断システムを開発する。このために半導体とバイオテクノロジーの異なる分野の研究者が集まる融合研究所を新設し、メルティングポッドを形成し新しいアイデアや原理を創出する。

1. 機関の現状

a. 提案機関及び協働機関の有する研究ポテンシャルの内容

ナノデバイス・システム研究センターは大学におけるシリコンデバイス・システムの研究センターとしては我が国で2番目に古い歴史を持ち、前身の集積化システム研究センター設立から19年間一貫してシリコンデバイスの微細化研究を続けており、現在は半導体デバイス・プロセス研究に必要な最先端クラス10スーパークリーンルームを有し世界的にも有数の規模を誇る研究センターとなっている。

ナノデバイス・システム研究センターは大学院先端物質科学研究科半導体集積科学専攻とともに、平成14年度に文部科学省の21世紀COEプログラム「テラビット情報ナノエレクトロニクス」拠点に選ばれ、ナノエレクトロニクス・集積化システム技術において多くの成果をあげている。また、我が国におけるナノテクノロジー総合支援プロジェクトにおけるシリコン・ナノ構造微細加工支援の5つの機関のひとつに選ばれ、産業界へのナノテクノロジー支援を行っている。

一方、発酵と言えば広島と言われる程の醸造産業の発展に前身の発酵工学講座から始まって大学院先端物質科学研究科分子生命機能科学専攻は重要な貢献をしてきた。瀬戸内海に

おける養殖魚のイリドウイルス病、カキ食中毒ノロウイルス、エビ白斑病ウイルスの検出や、最近ではATP（アデノシン3リン酸）増幅技術を開発し、高感度微生物検出法の開発を行うなど、バイオセンサーの開発にも力を入れており、微生物研究の最先端の研究水準を有している。更に独創的なシリコン結合ペプチドを開発しており、それを介してデバイス上へ抗体等のタンパク質を容易に結合させる技術も開発している。更に免疫アレルギー分野においては世界に比類のない有効治療率100%のアレルギーワクチンの開発に成功したばかりでなく、スギ花粉症・ダニアレルギー克服に向けた原因アレルギーの網羅的同定と分子診断・治療技術への応用など、ナノバイオセンシングの中核を担う免疫工学分野においても国内外をリードする突出した研究実績と基盤技術を有している。ナノデバイス・システム研究センターと協力して分子生命機能科学専攻は、微生物・ウイルスやアレルギー細胞応答の一個体レベルでの電氣的検出、あるいは免疫アレルギー疾患の次世代ナノ分子診断を実現できる世界トップレベルの微細加工技術とバイオ技術を有している。

協働機関エルピーダメモリ（株）はNECと日立が合併して創設した我が国唯一最大の最先端メモリ会社である。その研究ポテンシャルは韓国Samsung、ドイツInfineon、米国Micronと並ぶ世界の4大研究機関のひとつである。特に、微細化技術に関しては世界をリードしている。研究開発環境は最先端製造ラインと一体化し、300mm径のシリコンウェーハを用いて世界最先端のDRAM（ダイナミックランダムアクセスメモリ）開発および製造を行っており、微細化技術では80nmプロセスで2GビットDDR2 SDRAM サンプル出荷するなど、世界最高レベルの技術開発を行っている。広島大学と包括的研究協力協定を2003年に締結して、半導体集積回路分野で共同研究を行っている。

協働機関（株）生体分子計測研究所は、旧通商産業省工業技術院（現 産業技術総合研究所）アトムテクノロジー研究体によって行なわれた「原子・分子極限操作技術」プロジェクトの研究成果である「生体分子可視化・計測法」をベースとして平成11年に設立された旧工業技術院第1号ベンチャー企業である。東広島市に研究拠点を有し、バイオとナノテクノロジーを融合したナノバイオロジー分野で、独自に開発した技術である「DNA等の生体分子の可視化・計測、生体分子間力の計測、DNAナノ構造体形成」により、遺伝情報の転写や生体メカニズムをナノレベルから追及するナノバイオロジー

と呼ばれる融合領域をターゲットとしたモジュール式走査型プローブ顕微鏡や2つのプローブでのイメージングが可能なバイオ計測用マルチプローブ装置等の開発実績がある。

b. 人材育成の実績

研究開発	2003年度	2004年度	2005年度
国際会議発表	64	104	89
国内会議発表	112	143	122
学術雑誌掲載論文	65	66	89
特許出願	20	20	21

人材育成	2003年度	2004年度	2005年度
博士	23	14	20
修士	56	55	42
学生の受賞	9	9	7

c. 研究開発の実績

本拠点形成に関わる主要な要素技術の研究開発実績を以下に記述する。

(1) テラビットメモリ材料・デバイス

(a) 高誘電率絶縁膜（宮崎、芝原、中島）

微細MOSトランジスタの極薄ゲート絶縁膜やDRAM用キャパシタ誘電体薄膜に関する研究では、学界・産業界から注目される実績を長期に渡って積み上げてきた。最近では、高誘電率材料に関して、膜中およびSi基板界面や電極界面の化学構造・電子状態分析、電子障壁高さ評価、欠陥密度分布計測を精力的に行い、優れた成果を公表している。具体的には、高誘電率ゲート絶縁膜候補として目されていた2元素系の誘電体薄膜（Si₃N₄, Al₂O₃, HfO₂, ZrO₂, Y₂O₃等）を初めとして、アルミネートやシリケート等のより熱的に安定な多元素系誘電体薄膜（HfAlO_x, HfSiO_x (N), PrSiO_x)を半導体MIRAIプロジェクト、Selete、名古屋大学との共同研究を通して、分析・評価してきた。その成果は国内外で高く評価され、2000年以降、6つの国際会議（E-MRS (2006), AVS 50th Int. Symp. (2003), ICSFI-8 (2001), PCSI-28 (2001)等）で招待講演を行った。また、次世代金属電極材料の実効仕事関数評価についても、半導体MIRAIプロジェクト、Seleteの他、富士通研究所、(独)物質材料機構から依頼測定を受けている。メモリ用高誘電率材料の解析において、協働機関のエルピーダメモリ(株)と共同研究を平成15年度より開始しており、エルピーダメモリ(株)で試作された試料の化学構造・電子状態分析や欠陥密度分布計測を行って、プロセス最適化の指針を提供している。

(b) メモリ用量子ドット（宮崎、東）

シリコン量子ドットの高密度集積化技術、サイズ分布・位置制御技術、不純物添加による電子状態制御技術、Geコアの導入による量子ドット内ポテンシャル分布変調技術、Niシリ

広島大学ナノデバイス・システム研究センター、先端物質科学研究科半導体集積科学専攻、分子生命機能科学専攻及び工学研究科の融合領域における2003年以降3年間の研究開発実績、人材育成の実績は以下の通りである。

サイド化による状態密度・仕事関数制御技術、帯電電位計測技術等のデバイス化に不可欠なノウハウを蓄積するとともに、実際に量子ドットを電荷保持ノードとしたフローティングゲートトランジスタにおいて、室温・多値メモリ動作の実証に成功している。また、Si量子ドットを極薄シリコン酸化層を挟んで高密度多重集積した構造において、撮像デバイスに適合する光伝導性の発現を見出すとともに、集積構造の制御によって、可視-近赤外域のエレクトロルミネッセンスを室温で安定して得ることに成功した。また、量子ドットへの不純物添加による発光効率の向上も明らかにしている。シリコン量子ドット関連の成果は、1999年以降、7つの国際会議（ISSS-4 (2005), ISPN-2 (2005), VSSAA-2 (2002) POLYSE (2002), MNC (1999)等）で招待講演を行った。上述のように、デバイス化を見据えた材料分析・評価、プロセス制御技術の開発と新機能デバイスの応用を平行して推進しており、新材料探索や革新的デバイスの開発に向けた研究拠点として高いポテンシャルを有している。

(c) メモリ用トランジスタ（角南、横山）

加工寸法をFとすると現在までのDRAMのメモリセルは8F²の面積となり、16-32Gビットで高集積化限界がくると予想されている。この限界を打破するため従来の半分の面積4F²を実現する新しい構造のトランジスタとメモリセルを案出する。基本構造の三次元トランジスタは実現して基本性能の確認を行った。

(2) 次世代MOSトランジスタモデル”HiSIM”の開発と国際標準モデル化活動（三浦、江崎）

MOSトランジスタの回路シミュレーションモデルは、デバイス技術と回路設計とを結ぶ要である。次世代MOSに適用できる世界初の表面ポテンシャル記述に基づく物理モデルHiSIM (Hiroshima university STARC IGFET Model)を開

発した。高周波領域におけるキャリア移動の遅れを Non-Quasi Static Model として組み込むことで解析精度を上げると共に、熱雑音等のモデリング精度も向上させた。さらに HiSIM は物理的なモデルであるため、少ないパラメータで特性を表現でき、パラメータ抽出が容易である。また、シミュレーション時間が他のモデルより短く、数値解析が発散することがない。また、微細化トランジスタの特性を予測することができることも大きな特徴である。国際標準モデルの最終候補に選択され世界レベルで評価を受けた。投票では小差で次点となったが、その優れた特性を実証した。

(3) 無線インタコネクタ技術

(a) 集積化アンテナ無線インタコネクタ技術 (吉川)

集積化アンテナを用いてパルス電磁波伝搬によるチップ間インタコネクションを提案した。10GHz~20GHz の電磁波の伝搬を実測し、インタコネクションの使用できる、伝搬特性を実証した。高抵抗率シリコン基板を用いると伝搬減衰量が少なく-0.14dB/chip、-0.4dB/mm を確認した。UWB 信号であるガウシアンモノサイクルパルスの伝搬特性を実測評価し、20GHz 帯域で損失媒体であるシリコン基板を貫通してパルス波形が伝搬することを確認した。

(b) インダクタ無線インタコネクタ技術 (佐々木、岩田)

インダクタ対の共振特性を利用して低電力で高速データ転送できる構成を考案した。0.18umCMOS 技術を用いた 200umx200um の 9 ターンのスパイラルインダクタを多層配線技術で集積している。チップを対向させて、パルスを転送する実験を行い、消費電力 1mW でビットレート 1Gbps を実現した。

(4) 三次元集積 (岩田、吉川、佐々木)

2 種類の無線インタコネクタを用いた三次元集積技術 (3DCSS) とマルチオブジェクト認識システムを提案した。GWI:Global Wireless Interconnection を用いて、システム同期クロックを全チップへ供給し、認識のための参照データを転送するデータバスを構成し、LWI: Local Wireless Interconnection を用いて、隣接チップ間の 2 次元画像データ並列転送を実現するアーキテクチャを考案した。通常の貫通ビアを用いた 3 次元集積技術に比べて、無線であるために、異種材料、異種機能のチップを集積することが容易であり、精度の高い加工が不要なため製造が容易で信頼性が高い。

プロトタイプ三次元集積システムを試作した。CMOS チップにはスパイラルインダクタ 20 個とダイポールアンテナ 2 個を集積している。3 枚の薄層化したチップをフレキシブルプリント板を用いて電源配線を接続してスタック積層している。実測評価により、LWI を用いた無線インタコネクタにより、シリコンチップを通して、実画像を転送処理できることを実証した。

(5) 画像処理、物体検出・認識システム (マウシュ、小出、岩田)

連想メモリベースの画像処理システムの実現を目指して、画像分割、物体検出、認識のアルゴリズムとアーキテクチャを研究開発した。画像分割チップと最小距離探索機能を有する連想メモリのテストチップを試作した。

自動学習機能を持つ連想メモリのアーキテクチャを考案した。人間の脳を持つ短期記憶、長期記憶をモデルとする概念を開発し、テストチップを試作し、高い学習性能を実証した。また、画像分割処理を考案し、CMOS テストチップを試作・評価し、融通性の高い画像分割ができることを実証した。また、動物体追跡アルゴリズムを考案し、FPGA に実装して、人間のような非剛体に対しても正しく追跡できることを実証した。

マルチオブジェクト認識システムのアルゴリズムとアーキテクチャを提案した。これは 3DCSS で実現することを狙ったアーキテクチャである。主成分分析原理に基づく固有顔法を基本にして、顔領域の検出と顔認識を同一のチップで処理できるようなアーキテクチャを考案し、これをソフトウェアおよびテストチップを試作評価して、リアルタイム動作を実証した。

(6) ATP 生物発光技術の改良と微細生命体検出への応用 (黒田、山田)

ポリリン酸キナーゼとアデニル酸キナーゼを組み合わせた ATP (アデノシン三リン酸) 増幅技術を世界で初めて開発し、amol (10⁻¹⁸mol) レベルの ATP を検出できるようにした。これを細菌検査に応用すると、一匹の細菌が検出できることを示した (Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry 論文賞を受賞し、細菌検査のバイオベンチャー創出の基盤技術となった)。また、緑色蛍光タンパク質 (GFP) や生物発光酵素リフェラーゼと細菌表面を認識するタンパク質を融合させたものを作成し、バクテリアマーカーを開発した。これと TAS 技術を融合させた結果、細菌一匹のカウンティングができるようになった。

(7) シリコン結合ペプチドを用いたデバイス上への固定化技術開発 (黒田)

微生物の中からシリコン基板上に結合するタンパク質を発見した。このタンパク質の N 末端、C 末端領域には固有のシリカ結合領域 (シリカ結合ペプチド) があり、その領域と基板上に固定化したいタンパク質とを融合させることにより、簡単にシリコン基板上に目的タンパク質を固定化できることが分かった。今後、シリカ結合ペプチドの生化学的解析とさらなる結合力強化へ向けて研究する。

(8) アレルギーの次世代型テラーメイド医療技術の開発 (小埜・河本)

ホヤ喘息はかつて広島特産・カキの剥き身作業員に頻発し

た職業性アレルギーで深刻な問題であった。我々はその問題に医療分野と共同で取り組み、有効治療率 100%かつ副作用ゼロの優れたワクチンの創製に成功した。天然物アレルギーでこのような治療成果をあげた例は世界的にもなく、国内外の学界で高く評価されている。我々はこの実績をアレルギーの双壁であるスギ花粉症とダニ喘息に応用し、国内ではオンリーワン・世界的にも突出した抗原データベースを構築した。これを技術シーズとして科学技術振興事業団・重点地域研究開発促進事業や文部科学省・知的クラスター創成事業に参画し、患者ごとに異なる感作状況を一度に判定できる多重・多検体診断法の基盤技術整備に取り組んできた。血液サンプルの微量化も実現しつつあるが、もし将来的に耳などからの 1 滴の血液で診断が可能になればアレルギー診断のみならず血液検査技術そのものにも大きなパラダイムシフトをもたらすことが予想される。これに挑戦するための切り札として、ナノバイオセンシングによる革新的免疫診断技術の開発を目指す。

d. 協働機関における技術開発の実績

(1) 最先端 DRAM の技術開発 (エルピーダメモリ (株))

DRAM の大容量化を実現するために、誘電率の高い材料 (high-k 材料) と電極面積の拡大が必要である。high-K 材料として Ta₂O₅ を研究開発し、世界で初めて量産品に適用した。現在最先端 90nm 世代の製品には Al₂O₃, HfO₂ を適用している。電極面積拡大のためには多結晶シリコンの表面に半球状のシリコン粒を成長させて表面積を 2 倍にする HSG (Hemispherical grained silicon) 技術を開発し、量産に初めて適用した。また、微細でアスペクト比の高い孔に均一に被覆性良く膜形成するために ALD (Atomic Layer Deposition) 技術を開発し、前述の最先端製品に用いられる Al₂O₃, HfO₂ の成膜には既に ALD 技術を用いている。更に微細化された成膜方法として超臨界 CO₂ を利用した成膜方法を研究している。貫通ビアを用いた三次元集積技術についても、大容量化を目指して、構造、製造技術、メモリアーキテクチャを研究している。

(a) 第 33 回 (2002 年) 市村産業賞貢献賞受賞

”五酸化タンタル膜をキャパシタ絶縁膜とする超高集積 DRAM の開発”

エルピーダメモリ (株) 清水 眞二、(株) 日立製作所 安斎 昭夫、武田 英次

(b) 第 49 回 (2003 年) の大河内記念賞

”大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタ開発と実用化”

日本電気 (株) 辰巳 徹、渡辺 啓仁、酒井 朗、岡村 健司
エルピーダメモリ (株) 三宅 秀治

(c) 広島大学とエルピーダメモリ (株) 間で包括的共同研究に合意、2003 年 11 月

(d) エルピーダと Ovonyx 社が相変化メモリに関する技術契約で合意、2005 年 2 月

(e) 次世代大容量 DRAM 作製の超臨界キャパシタプロセス、NEDO 産業技術実用化開発費助成金採択、2005 年 7 月

(f) 512M ビット DDR3 SDRAM サンプル出荷開始、2005 年 11 月

(g) JEDEC Technical Recognition Award 受賞、2005 年 12 月

(h) 80nm プロセス 2G DDR2 サンプル出荷開始、2005 年 12 月

(2) デザイン設計と自己組織化を利用した核酸ナノ構造体の開発 ((株) 生体分子計測研究所)

核酸塩基のデザイン設計と自己組織化を利用し、ナノ構造体を自由自在に作製する技術を既に確立している。世界的にも DNA や RNA などの核酸、及び PNA などの核酸アナログ物質を用いたボトムアップ的なナノ構造体作製技術に関する研究は盛んに行われている。当社のナノ構造体の作製はまず、独自開発の配列デザインソフトウェアを用いて、作製したい核酸ナノ構造体の塩基配列をデザインする。次に、得られた配列のオリゴヌクレオチドを合成し、適切な温度条件でアニールすることによって構造体が組みあがる。

既に 2 次元構造体 (I 字型、Y 字型、六角形、六角形連結網目構造体) などの作製に成功した。この設計方法では、ナノ構造体のサイズ・形状・方向性制御が可能である。さらに、繰り返し配列を使用しないためアドレス指定が可能な構造体である。現在は、より複雑な構造体の作製、構造体の物性評価 (温度特性・電気特性・機械的特性評価等) に関する研究開発を進めている。

研究実績及び対外発表

(a) 平成 14 年度採択 NEDO 基盤技術研究促進事業 (5 年間)

(b) R. Mizuno, H. Harua, T. Morii, T. Okada, K. Nakashi, T. Asakawa and K. Hayashi. (2004) Transactions of the Materials Research Society of Japan 29, 439-441.

(c) R. Mizuno, H. Haruta, T. Morii, T. Okada, T. Asakawa, and K. Hayashi, (2004) Thin Solid Films 464-465, 459.

(d) 第 67 回応用物理学会学術講演会秋季大会「DNA ナノチューブ構造体の温度変化 AFM 観察による熱安定性評価」
(生体分子計測研究所：水野、春田、杉山、森居、岡田、九州大学：浅川、林)

2. 拠点化の対象とする先端融合領域及び研究開発

a. テラビットメモリ材料・デバイス技術

従来技術の延長線ではメモリの大規模化は 16Gbit 前後で終焉すると考えられている。広島大学とエルピーダメモリ (株) は協働で、テラビットメモリを実現するために新材料・新原理を探索し (3 年目)、デバイスレベルでメモリ動作を検証する (7 年目)。これを基礎に回路 TEG で性能及び歩留まりを検証し (10 年目)、本研究終了後は出向研究者とともに技術移管し、エルピーダメモリ (株) が量産性の検討に入る。

(1) 初年度～3年目

(a) 高誘電率膜材料技術

テラビットメモリ用の新規高誘電率薄膜の開発に向け、多元素系金属酸化物において、第一原理計算からの物性予測によるスクリーニングと実験的検証を併用することで、材料探索の基盤を確立する。実験的検証では、有機金属錯体を原料とした CVD やスパッタリングによって形成した薄膜について、既の実績のある光電子分光手法を適用する。具体的には、極薄誘電体膜の内殻光電子エネルギー損失スペクトルの閾値エネルギーからエネルギーバンドギャップを決定し、更に極薄誘電体膜と金属電極および半導体材料とのヘテロ接合の価電子帯スペクトルからヘテロ接合界面における価電子帯不連続量（正孔に対するエネルギー障壁高さ）を直接決定する。価電子帯不連続量とエネルギーバンドギャップの値を用いて伝導帯不連続量（電子に対するエネルギー障壁高さ）を決定する。また、界面欠陥密度分布の高感度定量には、光電子収率分光を用いる。この手法はゲート絶縁膜スタック評価において高い実績がある。第一原理計算と実験結果から構築した材料データベースに基づいて、ULSI 製造プロセスとの整合性の観点も考慮して、最適な材料選択を進める。さらに、有機金属錯体を原料とした CVD をベースに、原子層制御 CVD 技術の開発を行う。

(b) 量子ドットメモリデバイス技術

上記新材料探索と並行して、量子ドットを誘電体薄膜中に導入することで発現する新機能に関する研究を推進する。具体的量子ドット材料として、荷電子制御した Si 量子ドット、電子系のエネルギー離散化に極めて有効な量子ドットと期待されるシリコングermanium (SiGe) 系ナノ結晶 (Ge あるいはシリサイドをコアに持つ Si ナノ結晶を含む)、電子系に対する深い閉じ込めポテンシャル井戸が実現できる金属シリサイドドット (Ni シリサイドまたは W シリサイド) などに着目し開発を行う。これら量子ドットへの電荷注入・放出による帯電状態を導電性 AFM のケルビンモードを用いた表面電位測定により評価する。上記量子ドットを MOS トランジスタの要となるゲート絶縁膜スタック内にフローティングゲートとして組み込んで、室温・低電圧において多値動作する機能メモリデバイスの研究に取り組む。

(c) 新原理メモリデバイス

キャパシタによらない新原理の DRAM が開発されており、それぞれ通称と動作原理を挙げると FRAM (強誘電体とその分極)、MRAM (トンネル磁気膜と磁化)、PRAM (相変化膜と抵抗変化)、RRAM (抵抗とその変化) などである。これらのメモリセルを新たに三次元し、超自己整合を用いることにより、おなじ加工寸法で数分の一以下の面積を実現することを目的としている。

提案した新構造メモリセルを三次元超自己整合メモリ (3D

Super Self-aligned Memory : 略称 3D-SSM) を呼ぶ。トランジスタのゲートを絶縁膜上 Si (SOI) の梁 (ビーム) の側壁に自己整合で形成したもので、これによりマスク合わせが不要になり劇的な微細化が達成できる。

このメモリセルの主な特長は、SOI 層を縦に使い、自己整合で側壁にワード線を形成することによって、同じ加工寸法で理論上現行 DRAM セルの 1/4 以下の面積を実現できる。

埋め込み酸化膜によって電氣的・構造的にシリコン基板と分離できるのでチップ積層が可能となり、いっそうの大規模化に有利である。この構造は、FRAM、MRAM、PRAM、RRAM などに共通であり、可変抵抗膜として記述した部分と上下の電極を最適な材料とすれば全てに適用できるので、互換性、柔軟性、展開能力に優れる。DRAM は 4 倍の規模になれば次の世代に移行し、そのときメモリセル面積はほぼ 1/2.5 になる。提案する 3D-SSM セルは 1/4 の微細化が達成されるので、同じ加工寸法でほぼ 1.5 世代先のメモリが実現できる。現在の市場ではようやく 1G ビットは少量生産されている段階なので、8G ビットが実現できることになる。したがって、FRAM、MRAM、PRAM、RRAM に用いられているいずれかの可変抵抗膜あるいは強誘電膜を選ぶことにより、それぞれのメモリでの三次元メモリが構成できる。

(2) 4～7年目

3年目までに実施した新材料開発およびデバイス評価の知見に基づいて、少数電子、少数光子で動作するデバイスの機能実証と定量的性能評価を行う。デバイス単体としての性能評価にとどまらず、ULSI プロセスとの整合性を含めた機能実証をおこなうために、テラビット規模のメモリデバイスを試作し、基本動作を確認することを目指す。超高感度光センサーを集積したデバイスに於いては、少数フォトンによる動作、更にはメモリ機能と融合させた光入力メモリの基本動作確認を目標とする。デバイスの基本動作確認完了後は、産業化の上で最も重要なデバイス信頼性に関する研究に着手し、プロセス・デバイスとしての総合的な完成度の充実を図る。

(a) 二次元超自己整合テラビットメモリセル

本提案では、このメモリは、可能な限り密に配列した量子ドットに、走査トンネル探針によって書き込み・読み出しを行うものである。探針はアレー状に配列し、同じようにアレー状に配列した面と向かい合わせに位置あわせを行う。探針アレーにはトランジスタを接続し、読み出す探針を選択する。一つの探針で書き込み・読み出しをする量子ドットの総数は、トランジスタの配列ピッチで決まる。トランジスタピッチは 640nm、量子ドットピッチは 10nm の場合、64x64 の量子ドットアレーを一つの探針で走査する。走査は楕円に向かい合わせた電極の静電アクチュエータを用いるが、640nm の走査時間は十分短い。このメモリは 1012 ビット (1T ビット)/cm² の面密度を実現する。この提案した量子ドットアレーメモリ

は、1) 熱書き込みに比べ高速な電気書き込みを用いる、2) 多値化により、実質的な記録密度を高めることができる、3) 書き込み・読み出しトランジスタは利用できる微細加工で形成できるので、ドットと同じピッチは不必要である、という特長を持つ。実際にこのアレーを実現するために、本研究グループで研究実績のある超高密度量子ドットを形成し、これに電荷を多値(目標4値)で保存する。本研究では、超高密度量子ドット作製技術、カンチレバー集積技術、カンチレバー駆動用静電アクチュエータ作製技術、メモリセンシングデバイス・回路、およびメモリシステム設計に渡る、システム全体の研究を実施する。

(3) 8~10年目

少数電子・少数光子デバイスのインテグレーションに特化して、チップ性能評価を行う。テラビットメモリを三次元集積することによるブレインチップ試作、あるいは超高感度光センサーを有する化学・バイオセンシングのためのウェアラブルチップの試作に挑戦する。

b. バイオと半導体技術融合による多検体高速診断システムの開発

バイオ分子の迅速検出を可能とするナノバイオセンシングデバイスの開発は、ユビキタなバイオセンシングを組み入れた安全かつ安心な社会構築のための基盤技術になる。ここではシリカ結合タンパク質を利用したバイオ分子のシリコン基盤上への固定化技術開発を行い、シリコンナノワイヤや量子ドット光ディテクタを用いたナノバイオセンシングデバイスへ応用する

広島大学と(株)生体分子計測研究所は協働で、DNAからなる二次元、3次元DNAナノ構造体のテンプレート開発のためにオリゴヌクレオチド配列選択アルゴリズムの開発(3年目)、無機材料とのハイブリッド化技術の開発、動的可視化技術および機能性評価技術の開発(7年目)、DNAナノ構造体を利用した半導体バイオセンサーの開発(10年目)を目標とする。本研究修了後は技術移管し、電子機器メーカーと協働で量産性・製品化の検討に入る。

(1) 初年度~3年目

(a) シリコンナノワイヤへのバイオ分子固定化と微生物検出への応用

微生物にはシリカの細胞壁を持つ微生物が存在する。その様な微生物にはシリカに結合するタンパク質が存在する。シリカ結合タンパク質を生化学的に解明し、その性質を利用すれば、シリコン基盤上にバイオ分子を簡単に結合させることができると考えられる。すなわち、発見したシリコン結合ペプチド(Si-tag)と基盤上に固定化したい目的分子との融合タンパク質を作成すれば、シリカ基盤を特殊な化学処理をせずとも、簡単に固定できる。しかもこの技術はバイオ分子を基盤上に方向性を持たせて固定化できることになるので、活性

を保ったまま固定できると考えられる。Si-tagを付加したproteinAを用いれば容易に抗体が固定化できる。

次にシリコンナノワイヤを有するトランジスタを作製し、まず食中毒で問題となっている黄色ブドウ球菌に対する抗体、あるいは認識結合タンパク質をナノワイヤ表面に固定する。一つのナノワイヤトランジスタにはワイヤに沿って一種類の結合タンパク質が複数直列に配置している。このどれか一つの結合タンパク質に黄色ブドウ球菌が特異的に結合すれば、黄色ブドウ球菌の持っている実効的な電荷によりナノワイヤの電位が変化し、ワイヤ電流が変化する。結合タンパク質は直列に複数ある事で、ワイヤ上の抗体部分に結合する確率を向上させる事ができる。また、希薄濃度の黄色ブドウ球菌を検知するために、ナノワイヤトランジスタをアレー状に配置したセルを作製する。このアレーの何割のトランジスタのしきい値が変化したかを観測すれば、感度を上げられるばかりではなく、黄色ブドウ球菌の濃度を直接知る事も可能となる。

(b) DNAからなる二次元、3次元DNAナノ構造体のテンプレート開発と、それを用いた半導体バイオセンサーの開発

DNAは相補性やシンプル構造体という特徴があり、DNAを用いた機能性材料やナノデバイスの研究が始まっている。開発するDNAナノ構造体テンプレートは、自由自在に構造体をデザインし、かつ、自己組織化を活用し、アドレスリングできるものであるので産業に応用する場合に有利な機能性を持っている。テンプレートを開発するために、オリゴヌクレオチド配列選択アルゴリズムの開発、無機材料とのハイブリッド化技術の開発、動的可視化技術および機能性評価技術の開発など、理論的かつ実験的アプローチの併用、DNAから半導体にわたる技術・知見をフル活用して、基盤技術を確立し、発信基地を構築する。DNAナノ構造体をバイオセンサー素子として活用し、半導体との融合により、バイオセンサーを試作する。

(2) 4~7年目

(a) バイオ融合量子ドット光ディテクタによる生物発光の検出

半透明コントロールゲート表面に抗体を結合させる。表面電位を制御して絶縁膜表面電荷を正にし、通常負に帯電している微細生命体を高効率に静電吸引し、抗原抗体反応の速度を高めてターゲット微細生命体を選択捕捉する。次に微生物からのATPとルシフェラーゼによる生物発光反応で発生した極微弱光で生じる電子励起をトリガーとして、量子ドット立体集積構造内で、電荷移動を連鎖的に進行させる。この光誘起電荷移動で、トランジスタのチャネル電位が変化する。この変化は、ソース・ドレイン電流に指数関数的に反映される。これにより、超高感度光検出(微生物認識)を実現する。受光素子のサイズを発光源の微生物と同程度の大きさにすると同時に、発光源を限界まで受光素子に近づけて立体角を向

上させ、検出感度の高感度化を目指す。また、検出後、絶縁膜表面電荷を負にすることによって絶縁膜からの微生物の遊離を促進させ、チップの再利用ができるようにする。

(b) バイオ融合シリコンナノワイヤトランジスタによる分子診断システム

さらに微小な生命体の検出を目的として、ウイルスに対する抗体を付加したシリコンナノワイヤトランジスタを作成する。ここでも抗体にウイルスが特異的に付加すれば、ウイルスの持っている実効的な電荷によりゲート電位が変化し、ドレイン電流が変化する。抗体は直列に複数個配置している事でウイルスがトランジスタの抗体部分と結合する確率を向上させる事ができる。更に、希薄濃度のウイルスを検知するために、ナノワイヤトランジスタをアレー状に配置したセルを作製する。このアレーの何割のトランジスタのしきい値が変化したかを観測すれば、感度を上げられるばかりではなく、ウイルスの濃度を直接知る事もできる。

また、スギ花粉ならびにダニ抗原アレルゲンを固定化し、血清中に存在する抗体を検出する。抗原を多数配置するトランジスタを作成する。試作したトランジスタにアレルギー患者由来の血清または血球サンプルを反応させ、アレルゲンに結合し

た特異 IgE 抗体または IgE を細胞表面に提示している好塩基球をトランジスタのドレイン電流（あるいはしきい値）の変化で検出する。このナノワイヤトランジスタを複数個アレー状に配置する事で、感度の向上と濃度の検知も可能となる。同様に複数のシリコンナノワイヤを作製し、保有する複数のアレルゲンタンパク質が網羅的に検査できるデバイスを作製し、微量の血液で実施可能なアレルギーのナノ分子診断システムの構築を目指す。

(c) バイオ融合型光ディテクタによる生体分子の検出システム

エンドトキシン等の臨床領域における生体分子を高感度に検出するために、S/N 比の高い自己発光反応を利用してこれらの分子の検出システムを開発する。エンドトキシンはグラム陰性桿菌の細胞壁外膜内に存在する細胞成分であり、経口的に摂取しても毒性を示さないが、ヒトの血中に入るとピコグラム以下でも強い発熱、ショック症状、意識障害までもたらすため、注射用医薬品において厳しく規制されている。しかしながら生物活性（発熱活性）が高いエンドトキシンは生活環境内に多く存在し、医薬品への汚染が起りやすい。しかも耐熱性が高く、熱による不活化が難しいため、多くは菌が死滅しても、細胞壁成分であるエンドトキシン残存の危険性がある。このため発光酵素の高いシグナルを超微量のエンドトキシン検出に利用したシステムを開発することで、既存の検出反応システムを大きく上回る性能の反応系を構築する。また、微細加工技術を用いたマイクロ流路を利用することで、ダウンサイジングによる反応性の効率向上と試薬量の低減化

によるコストダウン、チップ化による使用者間差の解消を実現する。

(d) DNA ナノ構造体からなる階層的モジュール構造による高集積メモリの考案

階層的モジュール構造による高集積メモリの考察およびプロトタイプの開発は、3年目に開発予定の DNA ナノ構造体テンプレート技術に、積層化方法、最適なメモリ分子を所望の場所に配置する方法およびシグナル（メモリ）検出方法の確立が必要となる。これらの要素を、一筆書きダイヤモンド DNA から組み立てるナノチューブを基本単位として、レチノール系など蛍光分子の最適化、ニアフィールドなど検出技術確立し、かつ、それらを統合し、階層的な高集積メモリを実現する。

(3) 8~10年目

(a) 多検体高速診断システムの開発と医療への応用

医学部と連携し、癌マーカーなどを固定化したバイオ融合シリコンナノワイヤトランジスタを作成する。その他の病気に関連するマーカーに対してもバイオ融合シリコンナノトランジスタを作成し、多検体の高速診断システムを開発する。

(4) 本研究終了時

多種類微生物・ウイルスの同時高感度検出とともに、複数のタンパク質が網羅的に検査できるバイオセンサーナノデバイスを実現する。微量の水溶液や血液で実施可能な微生物・ウイルス・アレルゲン分子・癌早期診断のための多検体の高速診断システムを開発し、実用化する。

c. ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング技術

広島大学で、世界に先駆けて開発してきた物理モデルに基づくデバイスモデル HiSIM を更に発展・高度化させ、半導体に有機分子を組み込んだナノバイオデバイスの探索とモデリングを行い、開発したモデルを用いて、ナノバイオデバイスを設計、試作、評価する。

(1) ナノバイオ融合型 MOSFET デバイスのモデリング

(a) 初年度~3年目

回路シミュレーション用極低電圧 MOSFET（マルチゲート、細線デバイス）のモデルの開発を目指す。その際、これまでその寄与が無視できないと認識されているトランジスタレベルにおける微視的現象を原理に従って定式化し、回路モデルとして解析式を導く。回路モデルの開発は2段階で進める。まず MOSFET の先行トランジスタで、近未来に実用化が進むと考えられている完全空乏型 SOI-MOSFET モデルを開発する。続いて極低電圧 MOSFET を一般的な場合についてモデル化する。

1. 量子効果の通常動作時のモデル化量子効果は、波動関数に

従ってキャリアの存在確率が酸化膜表面から深くに移動する現象である。MOSFET に電流が流れる場合について、モデル化を試みる。

2. 量子効果の寄与が大きくなった場合のキャリア移動度のモデル化を行う。これまで検証されてきた MOSFET の移動度におけるユニバーサリティーが果たして強い量子閉じ込めが起きている場合にも成り立つのか、理論と実験結果の解析から明らかにし、移動度のモデル化を行う。

3. 通常の散乱を受けない弾道輸送の物理原理に基づいたモデルを構築する。走行中に散乱を受けない弾道キャリアは 100nmMOSFET で既に 10~20%あることが分かっている。これによって移動度の増加が予測されているが、細線デバイスにおいても同じことが成り立つのかを検証し、これをモデル化する。

また、MEMS デバイスや、光デバイスに応用可能な、材料・構造の機械的性質（歪みや共振周波数等）や光学応答を組み込んだナノバイオ融合モデリング技術を開発する。

(b) 4~7 年目

分子動力学アンサンブルモンテカルロデバイスシミュレータを開発して高周波領域で重要となる電子間相互作用を考慮したデバイス特性の計算を可能にする。弾道輸送と電子間相互作用を考慮した分子動力学アンサンブルモンテカルロシミュレータのコア開発は完了しており、ここでは、電界効果トランジスタへの発展、およびその際必須の量子サイズ効果をどのように導入するかが主要な課題となる。具体的には量子補正ポテンシャルを導入することを考えている。

回路シミュレーションに組み込むべき要素モデルを開発し、10nm 世代の MOSFET の回路モデル構築に必要な知見を提供する。デバイスの回路設計モデルを構築するには、それぞれのデバイス構造毎に移動度モデルや量子効果モデルを構築する必要があり、これが現実に解くべき課題である。ここで、分子動力学アンサンブルモンテカルロデバイスシミュレータを用いて、弾道輸送領域の MOS デバイスの移動度モデルおよび量子効果モデルを定式化する。

(c) 8~10 年目

極超低電圧ナノバイオ分子デバイスにおける電子の量子輸送およびイオン輸送の原子レベルシミュレータを開発する。ここで得られた知見を基に、将来発展が期待される生体ナノ分子デバイスの設計のためのモデルを開発する。この分子デバイスモデルが実現されれば、医療用分子デバイス開発における工数を削減できるとともに、副作用などの望ましくない効果を低減するための処方箋を具体的に作成することが可能になる。さらに、分子デバイス設計モデルは、量子理論に基づく原子レベルシミュレータの知見を用いて開発されるため、与えられた極限環境化における動作を予測できるとともに、所望の耐環境性能を得るための設計指針を得ることが可能となる。

(d) 本研究終了時

固体ナノ電子デバイスとバイオ分子デバイスの融合による新たな地平を切り開くことが期待され、多機能分子電子デバイスおよびハイパーブレインシステムの開発拠点になることが期待される。

(2) ナノバイオ融合機能デバイスの研究

本研究では、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を、微小生命体（ウイルス、細菌、アレルゲンなど）検出、光配線などに応用する研究を実施する。また既存の、DNA チップやバイオ、化学分析チップの性能向上、小型化、ユビキタス化の研究を実施する。この際、前記 (1) で開発する、材料・構造の機械的性質（歪みや共振周波数等）や光学応答を組み込んだナノバイオ融合モデリング技術を利用して、MEMS デバイスおよび光集積回路の設計と試作を行う。

(a) 初年度~3 年目

これまでに蓄積のある超微細、高精度シリコン加工技術を用いて、これまでにない、微細な MEMS を形成する技術を開発する。MEMS では半導体技術と異なり、アスペクト比が極めて高い加工が必要であり、この技術を新たに開発する必要がある。

既に、特殊な技術を用いて特定の面方位のシリコン基板では、高アスペクト比の立体構造を形成することに成功している。これを基盤として、どんな基板上でも高アスペクト加工を行うために、高アスペクト MEMS 用微細加工システムを用いてこの目的を達成する。

(b) 4~7 年目

最近 LSI の金属配線による処理速度限界の問題を克服するために、シリコンデバイスによる、発光デバイス、光スイッチ、光配線、受光素子の集積化に関する研究が急速に進んでいるが、光配線にマイクロマシン技術を利用したチップ内光配線という分野は未踏であり、大きな可能性を秘めている。サブミクロン以下のサイズの MEMS は GHz の応答速度を持つので、これらを並列にして作動させることによって、例えば 1000 個を並列に動作させれば Tbit/s の実行速度が得られる。この期間では、モノリシック MEMS 光スイッチの集積により Gb/s の信号転送を目標とする。

(c) 8~10 年目

MEMS 技術のナノバイオ技術への応用として、微小生命体の選別を行う技術を開発する。単純には、ある大きさの穴を設けることによって、それ以下のサイズの物体のみが通過できるフィルタが形成できる。さらに顕微鏡下で、微細物体を観測しながら、光 MEMS 技術（顕微鏡下で特殊な構造の物体に光を集光して照射することによって、その物体を移動させることができる）によって流路を切り替え、微細生命体の選別が可能となる。この技術によって、純粋な細菌やウイルスの集団を得ることができ、微小生命体の検出をより高感度に行うことができる。

(d) 本研究終了時

マイクロマシン技術と、電子デバイス、バイオ分子デバイスの融合による新たな地平を切り開くことが期待される。また、マイクロアクチュエータにも応用可能で、ドラッグデリバリーのような医療、治療分野への応用が期待できる。

d.三次元集積ワイヤレス信号処理技術

ブレインコンピューティングの神経線路として3次元ワイヤレス信号処理技術が重要になる。シリコンチップ間の接続技術としてUWB拡散スペクトラム電磁波通信を用いるワイヤレスインタコネクトを形成する。さらに、UWB電磁波技術の医療応用を目指した画像化技術の研究を行う。

集積化UWBアンテナアレーを作製し、超広帯域電磁波を誘電体媒質である人体の皮膚組織に対して放射し、組織中の腫瘍の誘電率と導電率が健康な部分と異なることにより生じる反射散乱波形を解析して腫瘍の3次元位置特定及び特性評価を行う。

(1) 初年度～3年目

まず、損失媒体としてシリコンチップを用い、6-20GHz帯域のUWB信号の送受信波形を画像化するためにFinite-Difference Time-Domain解析によるTime-reversalアルゴリズムを開発し、位置検出アルゴリズムを開発する。そのために、人体組織のシミュレーションとして損失の大きい導電性シリコン基板中の電磁波伝送特性を評価する広帯域アンテナと受信アンテナアレー及びUWB送受信CMOS回路を設計する。

(2) 4～7年目

送信アンテナから損失媒体中へ放射されたUWBパルスの反射信号をアレーアンテナで受信しTime-reversalアルゴリズムで2次元あるいは3次元画像に変換する回路を設計する。

(3) 8～10年目

媒体をシリコンから生体組織にし、送信アンテナからUWB信号を組織内部に照射し、それを異なる受信アンテナアレーで受けて信号処理し、組織内部に存在する腫瘍を誘電率、導電率の差によって位置と物性を同時に3次元的に画像化するシステムをCMOSで設計試作する。

(4) 本研究終了時

生体組織の内部構造の画像信号処理を行い、皮膚組織の腫瘍や肺の繊維組織化の様子をその3次元位置とともに可視化し、ワイヤレス通信技術によりウェアラブルな、または、携帯可能な組織内部構造の診断装置を試作する。

e.センサー・メモリ集積ブレインシステム

人間を超えた集積ブレインの実現を目指す。人間の脳は超大容量の記憶能力を持つとともに、生命維持・発展の本能と高度な生命活動のもとになる思考能力と精神的活動能力を持っている。ブレイン実現には、1) 人間より速い認知処理、2)

脳を超える記憶容量、3) 記憶情報を環境に適合して変更する学習機能の3つが必要である。これを実現するために連想メモリベースコンピューティング技術と、生体情報処理アーキテクチャ技術が必要である。目標とする集積ブレインを実現するには、センサー、情報処理、記憶、連想処理、学習処理などのサブチップを積層し、各チップ間を接続する可変学習機能を持ったインタコネクトを三次元集積することが必要である。このため、貫通ビア、無線、光など各種インタコネクト技術を融合した三次元集積システムを研究する。

(1) 初年度～3年目

1. 三次元集積化においても重要なインタコネクト技術が研究開発する。柔軟なインタコネクトは学習に基づく、結合ネットワークの可変性、結合の極性や強度の可変性により実現する。インタコネクトの原理には、電子、電磁波、磁気、紫外・遠赤外光など可能性のある方法を探索・研究し、これらの長所・短所の明確化、複合化の指針と実現できる性能を明らかにする。

2. 学習機能を有する連想処理機能の実現するために、高速・大容量メモリ集積化技術、アナログ処理技術、並びにデジタル処理技術の3つの集積化技術の融合が必要であり、これらの3つの技術を最大限生かすことができる融合化の指針を明らかにする。そして、再構成可能な機能メモリを用いたコンピューティングのための基本アーキテクチャを設計する。

(2) 4～7年目

1. ブレインのアーキテクチャのトップダウン的研究を本格化する。入力を画像情報に絞って、大規模メモリをベースにした構成、三次元集積への適用性、生体的学習機能の実現性に重点を置いて進める。また、前述のナノバイオセンサーを集積化する際のインタフェースとなる低雑音・低電力アナログ回路の基盤技術を確立する。

柔軟性のある情報処理原理としては、決定論的方法のみでなく確率的情報処理の導入を検討する。確率的情報処理はトンネリング現象との整合性がよいので、ナノデバイスで制御性のよい雑音生成機構とその応用を試みる。また、有機・バイオ素子によって、やわらかな情報処理、学習機能を実現できる可能性があるため、これによる機能実現を探索し、基礎データを蓄積して、可能性を明確にする。

2. 学習と認識処理の結果に基づいて、大容量の連想メモリベースコンピューティングによる判断と動作の決定方法の集積化技術を研究し、集積ブレインとしての構成法を開発する。そのために、メモリの高アクセスバンド幅を実現するマルチポート化技術、並びに、特徴抽出技術とバイオセンサー技術を融合し、低消費電力で実現する集積化技術を確立し、センサーの融合と学習機能の融合によるメモリベースコンピューティングアーキテクチャを開発する。

(3) 8～10年目

開発した要素技術を総合化して、有機分子素子も適用した

バイオセンサーとメモリ集積ブレインコンピュータのプロトタイプを設計、試作して、フィージビリティを評価し、基盤技術として確立する。また、応用展開の方向付けを行う。

(4) 本研究終了後

高機能センサーと通信機能を持ったウェアラブル、生体埋め込み可能なブレインコンピュータを実現し、新概念の集積プロダクト開発、高度なロボティクス、快適で安全な環境診断・制御システム、医療診断システムの実現に貢献する。

f. 関連分野における国内外の研究開発動向

(1) テラビットメモリ材料・デバイス技術

従来材料・プロセス制御による ULSI デバイス、半導体メモリ開発では、技術水準の高さは堅持しているもの、新規材料の半導体デバイスへの応用研究は、欧米・韓国に比べ遅れを取っており、我が国においても、デバイス化を見据えた新材料探索を効率的かつ強力に推進する必要がある。そのためには、計算科学による材料設計・物性予測、材料合成、材料評価、プロセスインテグレーション、デバイス化の各分野の専門家が横断的に連携して新材料探索・開発をする必要がある。Si ナノ結晶のフローティングゲートメモリ応用に関しては、従来の層状フローティング構造に比べ、電荷保持特性の向上、絶縁性劣化に対する長期信頼性およびトンネル酸化膜の薄膜化による高速書き込み・消去が可能となることから、国内外で盛んに研究されているが、Si ナノ結晶で生じる帯電状態の離散化に着目して、室温・多値メモリ動作の実現においては、当該グループが最も際立った特性を報告している。

(2) ナノバイオセンシングデバイス技術

最近相次いでナノテクノロジーを利用した微細生命体の検出技術が報告され始めた。同様の領域における諸外国と我が国との比較を行うと、我が国が進んでいるとは言い難い。しかしながら、わが国の半導体技術は世界最高水準であり、従来から培った微生物技術を利用して一気に形勢を逆転したいと考えている。シリコン系ナノ構造形成技術やデバイス応用では、世界トップクラスにあり、バイオナノテクノロジーとの融合によって、優位性は格段に高まる。

関連する半導体技術としては、微小電荷観測技術としての単一電子デバイス技術がある。これに関しては、シリコンの分野で日本が非常に優位性をもっている。ちなみに、当該研究グループは世界に先駆けてナノサイズのシリコンフローティングドットをシリコンナノワイヤにセルフアラインに形成する方法を開発している。これにより、室温での単一電子メモリ効果の観測にも成功している。また、シリコンナノワイヤとシリコンナノドットを交互に直列に配置する事により、室温で単一電子ロジック回路の動作も実現している。室温で単一電子ロジック回路を実現しているグループは、世界でも数グループである。

(3) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング技術

ナノバイオ融合機能デバイスを、ここでは、MEMS、光および生体検出・制御デバイスの融合したデバイスとして定義する。MEMS に関しては、国内では東北大学の江刺教授グループが最も進んでおり、歯車をはじめとする様々な微小な機械構造が、半導体微細加工技術を応用して試作されている。光 MEMS に関しては、立命館大学の浮田教授のグループが精力的に研究しており、光マニピュレーション技術により、微小な粒子を光を用いて位置制御することに成功している。しかし、これらの技術をウィルス、アレルゲンなど微小生体の検出・制御に応用する研究は、国内外を含めてまだ実施されておらず、本研究の独創的な点である。MEMS の光配線応用に関しては、国内では NTT、海外ではスタンフォード、MIT などで実施されているが、いずれも長距離光通信用のディスクリットデバイス応用が主であり、本研究のようにチップ内集積光配線にまで達していない。広島大学ナノデバイス・システム研究センターでは 15 年前からチップ内光配線の研究を行っており、多くの研究実績がある。モデリング技術に関しては、ペンタセン等の分子デバイスの電気伝導に関する研究が行われているが、分子デバイスと固体デバイスを融合した回路モデルの開発は行われていない。広島大学では、物理に基づく回路シミュレーションモデル HiSIM を長年に渡り開発しており、最近では光電子融合回路シミュレーションにも成功した。ここで、得られた知見を生かし、世界に先駆けてナノバイオ融合型半導体デバイスの回路モデルの開発を行う予定である。

(4) 三次元集積ワイヤレス接続技術

異なる機能を持つ ULSI を集積化してシステムとするために三次元集積技術を提案している。従来技術の延長線上にはシリコン基板を貫通する金属 (Cu) ピア接続技術が開発されている。しかしながら、将来の 20Gbps 以上の大容量データ伝送には寄生容量や抵抗のため物理的に限界がある。これに代わる方法として、我々はワイヤレス接続技術による三次元集積化技術を開発している。ウェーハレベル三次元積層 IC は米国でも研究されているが歩留まりが悪いため実用化が難しい。これに対して、チップレベル 3 次元実装技術は海外と比べて我が国の方が進んでおり、インダクタを用いたワイヤレス配線では国内の大学でも検討されている。しかし接続距離が数百 μm 以下の距離に限定されるという欠点がある。cm \sim m の距離まで対応できるシリコン集積化アンテナを用いた TEM 電磁波伝送を開発しているのは当グループだけである。インダクタ接続と電磁波接続を組み合わせることでチップ間距離が数十 μm から数 cm までワイヤレスで接続できる。

(5) ブレインコンピューティング

生体を模擬して、通常のコンピュータでは困難な処理実現を目指したニューラルネットワークやニューロチップの研究は欧米を中心に 20 年ほど前に着目され非常に活発化したが、汎

用ハードウェア化と汎用学習アルゴリズムの組み合わせでは実用にはほど遠いレベルで停滞した。唯一、人工網膜、ビジョンチップとしてバイオインスパイアードチップが実用になっている。

一方、ここ10年はDNA解析用バイオチップの研究が活発になり、実用化された。これにより、生命科学の分野を大いに発展させたが、科学実験用にとどまり、どこでも誰でも使え、非常に感度が高く、DNA、蛋白質、微生物、ウイルスなど検出対象の広いチップへの進化が続いている。このための課題として、新材料、新機能の集積化センサー、無線情報通信、無線電力供給が着目されている。さらに、医療分野で埋め込み型のチップの開発が活発化しており、眼球に埋め込む網膜チップ、神経細胞と情報交換するチップ、などが進んでいる。これらの分野は欧米に先導されている。

g. 先端融合領域として取り組む必要性・重要性

テラビット級の大容量・高速メモリの開発には既存の材料・プロセスおよびデバイス化技術の改良・洗練だけでは、実用化の観点からは極めて困難な状況にあり、これを抜本的に打開するためには、新材料探索や新原理の導入が強く望まれている。このためには、物性物理、応用化学と半導体デバイス工学がより密接に連携する必要がある。特に、デバイス化を見通した新材料探索・合成においては、計算科学による材料設計・物性予測を有効活用することが望まれる。また、有害化学物質や細菌を超高感度その場検知する化学・バイオセンサーの開発においては、特定の化学物質や細菌を選択的に吸・脱着させて、その際に生じる微小電位変化を計測するあるいは、吸着物質の表面化学反応や細菌から発生する極微弱発光を高感度検知する必要があり、短期間での実用デバイス開発には、半導体工学分野と材料科学、生化学、バイオテクノロジー分野の融合・連携が必須である。

ナノバイオセンシングデバイスの開発により一個体の微生物、ウイルス、あるいは患者ごとに異なる複雑なアレルギー細胞応答などを一度に多種類検出できる独創的なバイオナノ融合デバイスが実現すれば世界初となり、我々の生活環境や健康状態をモニターやバイオテロに備えたディフェンス技術としての世界標準技術となる事が期待できる。

一方、広島大学の立地環境では瀬戸内海を中心とする水産資源モニターにおいて重要である。養殖魚のイリドウイルス病、カキ食中毒ノロウイルス、エビ白斑病ウイルスに加えアサリ貝毒、赤潮藻等の高感度検出技術の開発は地元地域より強く期待されているものである。本技術が開発できれば、直ぐにでも現場での実証試験ができる。

さらに、画像処理のような通常のコンピュータでは処理量が多く、リアルタイム処理を低電力、小型システムで実現できない処理を実現するのは、生体情報処理原理によるバイオインスパイアードアルゴリズムとアークテクチャの持つ柔軟性が必須である。このための方策は大規模な素子を使って、

柔軟性を実現することである。本拠点の研究で新材料、新原理三次元集積メモリでテラビット規模のメモリが小型、低電力で実現されれば、ハード量の効率は犠牲にしても、ハードウェアとしてのメモリと情報処理アルゴリズムとの融合が新しい概念を生み、人間の脳のような情報処理システムの実現を可能にする。あらゆる環境で多種多様な情報を収集しながら、生命体のごとく生き抜くシステムが、ロボットなどに必須である。このような新しいパラダイムの研究を推進するのに、ナノ集積メモリ・コンピュータとバイオセンシングと生命情報処理の各領域の融合が必須であり、これによりブレインが実現される。

h. 先端融合領域として見込まれる将来性

デバイス寸法では nm レベルまで高度に微細化され、量子力学的効果まで実現できる半導体集積回路技術とバイオテクノロジーを組み合わせることで融合技術を開発することにより、有害化学物質や細菌を超高感度その場検知する化学・バイオセンサーが実現できる。さらに、テラビット級大容量・高速メモリの実現により、メモリベースコンピューティングを基本とするブレインチップの開発を飛躍的に加速することができ、ウェアラブルチップとして実用化することで、生活環境中に存在する人体に有害な化学物質（ガスやアスベスト等）や病原菌をその場検知し、常時モニタリング検査データをテラビットメモリに保存し、ユビキタスネットワークにより診断システムと連結構築できる。

市場創出の観点からはこのシステムは携帯電話のように個人ベースで携帯できる装置・デバイスであるため、価格を半導体集積回路技術により安く抑えることができれば、大量生産大量出荷が可能となる。これにより、アレルギーや感染症の人は未然にその場環境から退避することが可能となる。精度は精密検査より劣るものの、病気のマーカー等が既に発見されているような癌、糖尿病、エイズ等の重疾患も初期段階で検出できるようになる事が期待できる。

3. 拠点化構想の内容

a. システム改革の内容

(1) 企業が研究資源を提供しやすくするための特別な規則の設定

(a) 学内に存在する知財及び、共同研究により生じた知財の権利（報償金）等の取り扱いには包括的な規則を設け、個別研究テーマはこれを踏襲する。

(b) 知的財産を包括的に管理する運用者をおき、学内知財管理と、参画企業と連携させる。

(c) 研究ロードマップと知財開発ロードマップに基づき、戦略的な特許出願を行う。

(d) 企業もしくは大学から、研究成果を対外的に発表（論文の投稿を含む）する場合は事前に、相互の許可を得るものと

する。

(e) 特許権の出願および実施に関して下記内容を包括的に適用する。

- (1) 国内出願及び権利化：持分に応じて共同で行う。
- (2) 外国出願及び権利化：企業が単独で行う。大学はこれに協力する。
- (3) 自己実施：自己実施は相互に制約なく実施可能。
- (4) 他者実施：企業がその許諾権の一切を持つ。
- (5) 不実施保証：企業は実施に伴い相当の額を大学に支払う。ただし、その累積支払い総額の上限値を設定することができる。

(2) 多様な人材の活用方策

- (a) 若手研究者、女性研究者を雇用できる非常勤研究員ポストを新設する。
- (b) 広島大学北京研究センターを活用して優秀な中国人学生をリクルートする。
- (c) 国際学術誌の人事公募欄に求人案内、国際会議のキャリアセンタを利用し、優れた研究者の確保と外国人研究者を確保
- (d) 外国人研究者の受入れ態勢の整備として外国人学生・研究者への手当を獲得外部資金からの支出解禁
- (e) 外国人研究者に独立した研究費を与える。
- (f) 外国人宿舍の供与（借り上げ住宅提供）。
- (g) 海外大学間連携により学生研究員の相互滞在研究を促進

(3) 人材流動化の促進

- (a) 企業の研究者が出向して大学非常勤研究員として雇用される場合、大学職員の給与水準を超えて、企業と同等の給料を支払うことができる。
- (b) 企業が出向研究員の給料を支払うことは大学と企業で合意の上可能である。
- (c) 研究能力に特化した評価制度を作成して、能力給の導入、年俸制を導入する。
- (d) 多様なキャリアパスとしてナノデバイス・システム研究センターは理論物理の博士課程修了者を研究員として雇用し、数年間の研究を経て大学電子工学科助手や電機メーカー研究員として就職する道を拓いており、これをさらに展開して、融合研究所においてもバイオから半導体への研究移動や融合研究そのものにより、これまでの物理から電子工学という縦のパスに加えて、バイオから半導体という横の多様なキャリアパスを提供する。

b. 企業との協働体制

(1) 企業からのコミットメントの具体的な内容

- (a) エルピーダメモリ（株）
- (1. テラビットメモリのための材料性能および信頼性の評価

のための製造設備提供、評価設備の提供。

- (2) 専任研究者3名の投入。
- (3) 協働研究学生の受入。

(b) (株) 生体分子計測研究所

- (1) 研究プロジェクトを組織し、専任1名若手研究員を含む3名を確保する。
- (2) 専任研究員の使用する消耗品費は企業が提供する。
- (3) 必要に応じて企業の設備の協働利用を行う。

(2) 研究者・技術者の確保方策

- (a) 国際的に高い実績を有する研究者・技術者を高い給料を保証して雇用する。費用はプロジェクトから支出。
- (b) 高い実績を有する研究者技術者は客員教授、あるいは特任教授としてプロジェクトに参加する。

(3) 協働体制の運営方法（運営委員会の設置等、意思決定プロセス等マネジメントの具体的な方法）

- (a) 大学側は学長、企業側は社長をトップとするマネジメントボードを組織する。
- (b) 企業と大学の協働プロジェクトのリーダーを企業から、サブリーダーを大学から選任する。
- (c) 運営委員会で長期戦略を決め、実行委員会で日々の戦術を企画実行する。
- (d) 大学側は管理部門、研究支援部門に専任を配置する。

(4) 研究成果の取扱いの方針

- (a) 学内に存在する知財及び、共同研究により生じた知財の権利（報償金）等の取り扱いには包括的な規則を設け、個別研究テーマはこれを踏襲する。
- (b) 長期テーマの副産物も協働企業で迅速なビジネス化、第3者への技術実施許諾による研究投資の回収と再投資を進める。
- (c) 開発成果の実用化・産業化のために技術移転システムを作る。
- (d) 企業への技術移管は協働企業の場合は無償で移管するが、それ以外の企業には有償実施許諾を与える。
- (e) 技術移管に際しては、特許、技術報告書等のドキュメントの形で移管する場合、装置及びレシピをつけて移管する場合があります、企業の実用化検討のレベルに応じて取り決める。
- (f) 技術移管に際して特許、技術報告書等のドキュメント以外に、プロセスノウハウがあり、企業秘密に該当するノウハウを指定することで開示しない場合がある。

c. 人材育成

(1) 人材育成のための具体的な仕組み

- (a) 博士課程前期、後期学生をRAとして雇用し、研究の基

礎を学ばせながら育成する。その際、入学金や学費を補填する。

(b) 博士課程修了者をプロジェクトメンバーとして雇用し、この分野における専門家として育成する。

(c) バイオから半導体や、半導体からバイオへの研究を転向を希望する課程学生あるいはポスドクの場合は最大3年間、融合研究所で融合領域研究を行い、新たな専門知識を得て、就職する。

(2) 育成された人材の活用方策

(a) 人材の活用方法あるいはキャリアパスの多様化について、ナノデバイス・システム研究センターの一例を示す。半導体分野の博士研究員は電子工学専攻であることが望ましいが、この分野の大学院修了生はほぼ100%企業へ就職する。一方、理学部理論物理系の博士修了者は大学等で就職し研究を継続することを望むが、一般的にその就職の間口は狭い。理学部物理系の博士研究員は電子工学の専門知識は無くても、数学、物理に深い理解力を有している。このため、逆に工学部系の学生では及ばない原理的な考察ができる。したがって、物理系の博士研究員は実験結果の理論的解析において威力を発揮する。このように、異なる分野の博士研究員であっても、正しい研究のベクトルを指示すれば、新しい切り口の研究成果を出すことができるから、バイオ専攻の学生が半導体の研究に転向する事も、半導体専攻の学生がバイオの研究に転向できる仕組みを作り多様なキャリアパスを形成する。この結果、バイオ、半導体、あるいは融合領域で実績を出した若手研究者は大学の助手として、融合領域に進出する企業の研究者として就職する。

(b) 融合領域のベンチャー企業を興す。

d. 波及効果

大学と協働企業が、それぞれ得意とする分野を持ち寄って融合開発することで、新しい産業を創出する。同時に大学と協働企業が融合領域の研究を推進する研究所を設立するとともに、新研究所併設の新産学連携専門職大学院を新設して人材を育成する。

4. 具体的な達成目標

a. 3年目における具体的な目標

テラビットメモリのため多元系誘電体を合成探索し、比誘電率60以上を実現する。

一方、ナノワイヤ、量子ドットMOSFETナノバイオセンサーを試作し、微弱な電荷・光によるターゲット微生物の超高感度検出デバイスプロトタイプを試作。

b. 7年目における具体的な目標

ナノバイオセンサーを高度化し1個のアレールゲンを検出するチップを実証開発する。メモリは1x10¹²bit/cm²集積度をデバイス試作、記憶回路試作により実証。

c. 実施期間終了後における具体的な目標

メモリベースのバイオセンシング・プロセッシングチップを試作し、ユビキタスネットワークによる診断システムを実証する。

5. 実施期間終了後の取組

広島大学はエルピーダ(株)をはじめとする協働企業と連携してメモリベースバイオセンシング融合領域の研究・開発を推進する機関を設立する。ここでは、協働企業から資金を調達し、外部の競争的資金を獲得して研究費とすることにより、半導体集積科学・バイオ科学の融合領域の研究をより発展させるとともに、人材を育成し応用領域、応用産業にも貢献する。

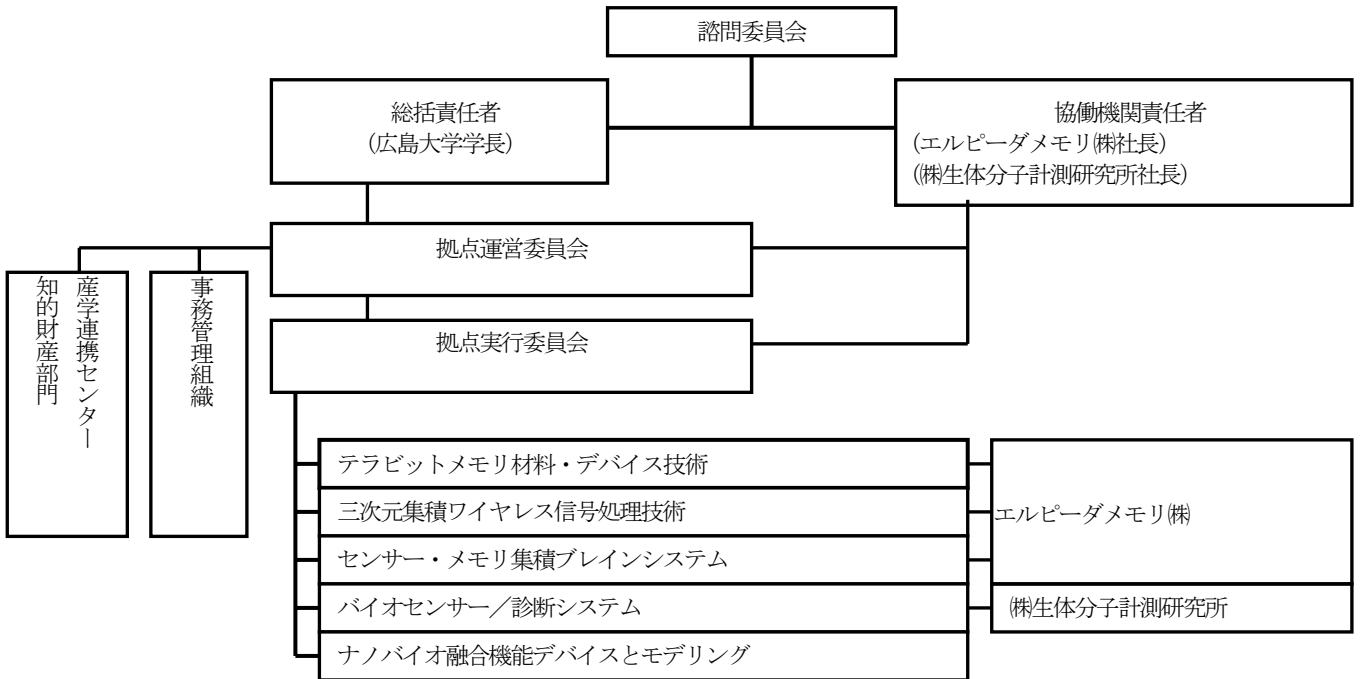
6. 期待される波及効果

本拠点のもたらすイノベーションは安全、安心、健康な社会の実現を目指すものであるが、その融合領域の拡大により、従来の学問領域を越えて、幅広く人間と技術に関わる学問と産業の革新へと発展させることができる。

融合領域イノベーション拠点は、世界をリードする新概念と新技術の開拓に挑戦する気質と知識と実力を備えた研究者・技術者を育成するシステムとして、他の多くの領域に横断的にその効果を波及させることができる。

また、大学と企業が一体となった研究を通して、人材を育成するシステムが構築でき、これが他分野にも適用される。

7. 実施体制



氏名	所属部局・職名	当該構想における役割
◎岩田 穆	広島大学大学院先端物質科学研究科・教授	センサー・メモリ集積ブレインシステムの研究開発
○吉川 公麿	広島大学ナノデバイス・システム研究センター・センター長・教授	三次元集積ワイヤレス信号処理技術の研究開発 UWB 電磁波画像化技術の研究開発
○宮崎 誠一	広島大学大学院先端物質科学研究科・教授	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
角南 英夫	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・特任教授	1T (7F) ビット DRAM 向けメモリセルの研究開発
○横山 新	広島大学ナノデバイス・システム研究センター・教授	ナノバイオ融合機能デバイスの研究開発
マタウシュ・ハンス・ユルゲン	広島大学ナノデバイス・システム研究センター・教授	センサー・メモリ集積ブレインシステムの研究開発
三浦 道子	広島大学大学院先端物質科学研究科・教授	バイオ融合型半導体デバイスモデリングの研究開発
○黒田 章夫	広島大学大学院先端物質科学研究科・教授	ナノバイオセンシングと高速診断システムの研究開発
山田 隆	広島大学大学院先端物質科学研究科・教授	ナノバイオセンシングシステムの研究開発
小埜 和久	広島大学大学院先端物質科学研究科・教授	ナノバイオセンシングシステムの研究開発
奥山 喜久夫	広島大学大学院工学研究科・教授	テラビットメモリ材料・プロセス技術の研究開発
芝原 健太郎	広島大学ナノデバイス・システム研究センター・准教授	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
中島 安理	広島大学ナノデバイス・システム研究センター・准教授	ナノバイオセンシングデバイスの研究開発
小出 哲士	広島大学ナノデバイス・システム研究センター・准教授	センサー・メモリ集積ブレインシステムの研究開発
東 清一郎	広島大学大学院先端物質科学研究科・准教授	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
佐々木 守	広島大学大学院先端物質科学研究科・准教授	三次元集積ワイヤレス接続技術とブレインシステムの研究開発
江崎 達也	広島大学大学院先端物質科学研究科・准教授	バイオ融合型半導体デバイスの研究開発

河本 正次	広島大学大学院先端物質科学研究科・助教	ナノバイオセンシングデバイスの研究開発
村上 秀樹	広島大学大学院先端物質科学研究科・助教	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
吉田 毅	広島大学大学院先端物質科学研究科・助教	センサー・メモリ集積ブレインシステムの研究開発
野田 健一	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・特任准教授	バイオ分子固定化のための基盤技術の研究開発
亀田 成司	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・特任准教授	センサー・メモリ集積ブレインの回路、アーキテクチャの研究開発 三次元集積化バイオセンサーシステムの設計、試作、評価
村上 裕二	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・特任准教授	半導体デバイス及び MEMS 技術を使ったバイオセンサーの研究開発
石川 智弘	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・特任准教授	バイオセンサー/診断システムの開発及び集積化バイオ MEMS の基盤技術構築の研究開発 ナノバイオ融合機能デバイスとモデリングの研究開発 三次元集積ワイヤレス信号処理技術の研究開発
肖 夏	広島大学ナノデバイス・システム研究センター・外国人研究員	三次元集積ワイヤレス信号処理技術の研究開発
野田 智秀	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	ナノバイオセンサーに搭載するアレルゲン分子の探索と創製の研究開発 アレルゲンの固定化とバイオセンシングのための基盤技術の研究開発
浦田 雅章	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	シリコンペプチドを利用した半導体基板へのタンパク質固定化技術の研究開発 シリコンバイオセンサーに利用するルシフェラーゼ改良の研究開発
奥山 清	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	次世代 DRAM セル構造の研究開発 三次元 MOS トランジスタ形成プロセスの研究開発
床波 志保	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	シリコンペプチドを利用した半導体バイオセンサーの研究開発 シリコンバイオセンサーに利用する ナノ加工技術の研究開発
田主 裕一朗	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	超低電力集積回路を開発するための 光配線集積回路の研究開発 MEMS 技術と光技術を融合する研究開発
鈴木 昌人	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	MEMS の基礎技術の研究開発
佐々木 信雄	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	システム・回路設計の研究開発
汐崎 充	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	三次元集積ブレインの回路のための 超高速クロック発生及び分配技術の研究開発 超高速クロックを十分活用できる回路、アーキテクチャの研究開発
上口 光	広島大学半導体・バイオ融合集積化技術の構築プロジェクト・研究員	大容量・低電圧メモリベースシステムの研究開発 メモリベースコンピューティングアーキテクチャの研究開発

池田 博明	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Principal Professional	センサー・メモリ集積ブレインシステムの研究開発
三宅 秀治	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Principal Professional	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
石野 正和	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Executive Professional	センサー・メモリ集積ブレインシステムの研究開発
大湯 静憲	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Executive Professional	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
梶谷 一彦	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Executive Professional	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
小此木 堅祐	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Professional	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
堀川 貢弘	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Professional	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
梯 英一郎	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Professional	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
谷奥 正巳	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Senior Engineer	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
清村 貴利	エルピーダメモリ (株) T&D Office・Engineer	テラビットメモリ材料・デバイス技術の研究開発
岡田 孝夫	(株) 生体分子計測研究所 ・代表取締役	バイオセンサー/診断システムの研究開発
杉山 幸宏	(株) 生体分子計測研究所 ・次長	バイオセンサー/診断システムの研究開発
水野 里香	(株) 生体分子計測研究所 ・研究員	バイオセンサー/診断システムの研究開発

8. 各年度の計画と実績

a.平成 18 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. 有機金属錯体 MOCVD による新規高誘電率薄膜形成技術を確立する。

(2. Si 系量子ドットフローティングゲートにおける電荷保持特性を評価する。

(3. 従来の DRAM メモリセルの半分の面積を実現する 4F2 セル構造の案出と、インテグレーションプロセス第 0 次案を構築する。

(b) バイオセンサー/診断システム

(1. Si トランジスタ (中島試作) 上にシリコン結合ペプチドを用いて、目的とするタンパク質を固定する方法を開発する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. MEMS 利用ナノバイオ融合デバイスの提案と、MEMS 用レジストを用いた露光、エッチング技術の開発を行う。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 伝送媒体 3 次元誘電率分布の UWB 受信アンテナアレイによる受信散乱波形シミュレーションを行う。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. 三次元集積の高機能化のために、磁気、電磁波を複合したインタコネクトの TEG 設計を行う。

(2. 再構成可能な機能メモリを用いたコンピューティングアーキテクチャの基本構成の検討を行う。

(2) 実績

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. 高誘電率膜材料技術：次世代 DRAM キャパシタ用新規高誘電率膜として、La 系酸化物に着目し、有機金属錯体を原料とする CVD 技術の開発を行うと共に製作した膜の化学構造および電子帯構造を定量評価し、その有用性について見通しを得た。

(2. 量子ドットデバイス技術：Si 量子ドットおよび Ge をコアに持つ Si 量子ドットへの P および B 添加が、量子ドットの帯電特性に及ぼす影響を定量評価し、Si 系量子ドットフローティングゲートの設計指針を得た。

(3. 新原理メモリデバイス：微細化、長期記憶持続動作が

可能な RAM のメモリエル、これを実現する材料およびその構造を調査・評価した。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. 微細加工技術を駆使して、バイオセンサーのベースとなる Si ナノワイヤトランジスタを試作した。

(2. 新発見の Si 結合ペプチドと受容体との融合タンパク質を作成して、受容体を Si 基盤上に固定する方法を研究した。

(3. 主要アレルゲン分子とシリコン結合ペプチドとを融合させた組換えタンパク質の発現・精製を研究した。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. 極低電圧動作時を表現するナノバイオ融合デバイスのモデリング技術の基礎研究を立ち上げた。

(2. 高アスペクトな超微細 MEMS のためのエッチング装置を立ち上げ、レジスト露光およびエッチング技術を開発した。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

伝送領域の誘電率の分布を画像化を目指し、3-5GHz 帯域の UWB 電磁波信号を送受信するアンテナと無線回路を設計した。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. センサー集積三次元アーキテクチャ：電磁波、磁気、光インタコネクタを機能モデルで比較検討し、これらを複合化する効果を明確化した。

(2. メモリベース並列検索アーキテクチャを検討し、自由に構成可能な多バンクメモリの基本設計を行った。

(3. ポストメモリアーキテクチャ：再構成可能な論理・演算ユニットのクラスタを用い、自由に構成可能な多数バンクメモリを結合した基本方式を開発した。

b.平成 19 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. 新規高誘電率薄膜の電氣的・光学的基礎物性評価と原子層制御 CVD プロセス技術の開発を行う。

(2. テラビットメモリのための記憶原理の探索と記憶新材料の定量評価と候補を検証する。

(3. 記憶セルの構造と記憶新材料による試作・評価を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. バイオ融合型シリコンナノワイヤトランジスタを作製し、その上にシリコン結合ペプチドを用いて、目的とする有機分子を固定する方法を確立して、バイオセンサーの基礎となる界面制御技術を開発する。

(2. DNA ナノ構造体の設計、試作、評価を行い、バイオセンサーへの適応を検証する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. 極低電圧ナノバイオ融合デバイスのモデリング技術を開発する。

(2. 超微細 MEMS を用いたナノバイオ融合デバイスのた

めに、高アスペクトエッチング技術を用いて、デバイスとして Si 可動構造形成の基礎技術を開発する。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. UWB 電磁波の送受信波形から伝送媒体の誘電率分布を画像化する技術を開発する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. 三次元集積の高機能化のために、磁気結合、電磁波結合、光結合を複合したインタコネクタの設計・評価を行い、センサーインタフェース要素回路構成法を開発する。

(2. 再構成可能なメモリベースコンピューティングアーキテクチャの設計、機能メモリの設計を行う。

c.平成 20 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. キャパシタ信頼性試験と原子層制御プロセスの最適化を図る。

(2. 量子ドットメモリの信頼性試験とデバイス設計パラメータの抽出を行う。

(3. 16G (ギガ) ビット DRAM を想定した 4F² セル小規模アレーの試作による、量産試作上の課題の抽出を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. Si ナノワイヤトランジスタをアレー化する。その上に Si 結合ペプチドを用いて、目的とする有機分子を固定化しバイオセンサーの試作品を作成する。微弱光センサー (宮崎試作) を用い、微生物を計測する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリングを行う。

(1. MEMS 基盤技術 (高アスペクト・可動構造) の確立する。

(2. 極低電圧デバイスモデル開発と細線デバイスへの適用可能性を探索する。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 受信波形から伝送媒体の 3 次元誘電率分布及び位置を計算する Finite-Difference-Time-Domain 解析による Time-reversal 等最適アルゴリズムを開発する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. 複合インタコネクタによる情報転送技術の特性を検証する。

(2. TEG の評価と再構成可能なメモリベースコンピューティングアーキテクチャ・回路の改良を行う。

d.平成 21 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. キャパシタレベルでのプロセスインテグレーションと信頼性評価を行う。

(2. 高密度立体集積した Si 量子ドットの光応答解析と機能メモリへの応用を図る。

(3. 64G ビット DRAM アーキテクチャ・メモリセルの提案と、インテグレーションプロセス第0次案の構築を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. 量子ドット MOSFET ナノバイオセンサーを試作し、光によるターゲット微生物の超高感度検出デバイスプロトタイプを考案する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. MEMS 技術を用いた光配線の基礎技術の開発を行う。

(2. 回路応用を目指したモデル検証を行う。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 損失誘電体媒体中へ放射された UWB パルスの反射散乱信号を受信し 3 次元画像に変換する回路を CMOS で設計する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. センサーインタフェース回路 TEG の試作評価を行う。

(2. センサーの融合と学習機能の融合によるメモリベースコンピューティングアーキテクチャの基本設計の検討を行う。

e.平成 22 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. キャパシタの極微細化と長期信頼性試験を行う。

(2. 光入力 Si 系量子ドット機能メモリの光感度の向上を図る。

(3. 64G ビット DRAM メモリセル向け、絶縁膜材料の開発を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. 光によるターゲット微生物の超高感度バイオセンサーを試作する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. 光配線による信号伝達実効速度 1kb/s を目標（並列動作）とし、実現する。

(2. 回路モデルとしての信頼性を評価する。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 3次元の誘電率分布を画像変換処理する CMOS 回路特性を評価する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. センサーとインタフェース回路を集積した TEG を設計評価する。

(2. センサーの融合と学習機能の融合によるメモリベースコンピューティングアーキテクチャ TEG 回路の設計を評価する。

f.平成 23 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. DRAM での性能試験により、新材料の実用性を最終判

定する。

(2. 少数フォトンで動作する Si 系量子ドット機能メモリの設計・試作・評価を行う。

(3. 64G ビット DRAM 小規模アレーの試作と、デバイス・プロセス技術開発を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. ウイルスに対する抗体を付加したシリコンナノワイヤトランジスタを作成し、バイオセンサーを試作する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. 前年度に引き続き、光配線による信号伝達実効速度 1Mb/s を目標（並列動作）とし、実現する。

(2. 分子デバイス用モデルの検討を行う。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 3次元誘電率分布を有する誘電体構造の CMOS 集積化アンテナアレー画像化システムによる画像化の実証を図る。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. センサーとインタフェース回路を集積した TEG に無線通信機能を集積し、動作の検証を行う。

(2. TEG 回路の評価とセンサーの融合と学習機能の融合によるメモリベースコンピューティングアーキテクチャの改良を行う。

g.平成 24 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. 新規 DRAM のトータルプロセスの最適化と超高密度集積化の検討を行う。

(2. 多値動作する光入力 Si 系量子ドット機能メモリの設計・試作・評価を行う。

(3. 超高密度量子ドットアレーと集積化カンチレバーを組み合わせた新規テラビットメモリの開発を図る。

(4. 1T (テラ) ビット DRAM を実現するメモリセル構造の提案とデバイス・プロセス課題の抽出を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. スギ花粉ならびにダニ抗原アレルゲンを固定化し、血清中に存在する抗体を検出するバイオセンサーを試作する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. 引き続き、光配線による信号伝達実効速度 1Gb/s を目標（並列動作）とし、実現する。

(2. 分子デバイス用モデルの要素技術の開発を行う。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 生体（有機）組織内部に存在する誘電率、導電率の異なる部位の位置を画像化するシステムを CMOS 回路設計する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. センサー集積三次元プロトタイプシステムの試作評価を行う。

(2. 再構成可能なメモリベースコンピューティングアー

キテクチャのプロトタイプ設計を行う。

h.平成 25 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. 新規 DRAM 歩留まり向上技術、特性ばらつき低減技術の確立を図る。

(2. Si 系量子ドット機能メモリの微細化を行う。

(3. 集積化カンチレバーのセンシング感度の向上を図る。

(4. 1T ビット DRAM を実現するメモリセル構造小規模アレーの試作と、量産技術開発上課題の抽出を行う。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. 医学部と連携し、癌マーカーなどを固定化したバイオ融合シリコンナノワイヤトランジスタを作成する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. MEMS 技術をナノバイオ融合デバイスへ応用するための基盤技術開発を行う。

(2. 回路モデルとしての妥当性を検証する。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 試作した CMOS 回路により組織内部に存在する腫瘍の 3 次元位置を画像化する性能を評価検証する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. 大容量メモリを三次元集積するための TEG の構造設計と試作を行う。

(2. 大容量メモリとセンサーインタフェースを用いた再構成アーキテクチャの TEG 設計を行う。

i.平成 26 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. 新規 DRAM において、長期信頼性を確保する。

(2. Si 系量子ドット機能メモリの特性ばらつきの定量評価を行う。

(3. 超高密度量子ドットアレー構造の超精密制御技術の確立を図る。

(4. T ビット DRAM を実現するメモリセル構造大規模アレーの試作と、メモリ回路動作課題の抽出を図る。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. 多くの病気に関連するマーカーに対してもバイオ融合シリコンナノトランジスタを作成し、多検体の高速診断システムを開発する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. MEMS 技術を用いたナノバイオ融合デバイスの試作と動作実証を行う。

(2. ナノバイオ融合モデルの可能性検討を行う。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 乳ガンを想定して 3 次元位置画像化する CMOS 回路システム性能を評価検証し、分解能特性を改善する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. センサーのメモリを集積した三次元ブレインの TEG を設計する。

再構成アーキテクチャの TEG の評価とメモリベースブレインコンピューティングアーキテクチャの検討を行う。

j.平成 27 年度

(1) 計画

(a) テラビットメモリ材料・デバイス技術

(1. 超高密度 DRAM の試作・評価を行う。

(2. Si 系量子ドット機能メモリの高密度集積化と信頼性確保を図る。

(3. 超高密度量子ドットアレーメモリの試作と評価を行う。

(4. 1T ビット DRAM を実現するメモリセル・アーキテクチャの実現を図る。

(b) バイオセンサー／診断システム

(1. 微量の水溶液や血液で実施可能な微生物・ウイルス・アレルギー分子・癌早期診断のための多検体の高速診断システムを開発し、実用化する。

(c) ナノバイオ融合機能デバイスとモデリング

(1. MEMS 技術を用いたナノバイオ融合デバイスの高度化の研究を行う。

(2. ナノバイオ融合モデルの回路シミュレーション技術の開発を行う。

(d) 三次元集積ワイヤレス信号処理技術

(1. 乳ガンを想定した 3 次元位置画像化 CMOS 回路システム性能を実証する。

(e) センサー・メモリ集積ブレインシステム

(1. センサー・メモリ集積三次元ブレイン TEG 試作評価を図る。

(2. 機能メモリベースブレインコンピューティングアーキテクチャ設計を行う。

9. 年次計画

項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度
●拠点化構想 半導体製造設備整備		↔			
		・原子層体積(ALD)装置導入			
大容量・高速機能メモリ設計・試作	↔	↔	↔	↔	↔
	・テラビットメモリ用材料の基礎検討	・テラビットメモリ用材料の実験による探索	・新材料と記憶原理の候補の提案と選択	・新材料テラビットメモリの原理と記憶セル構造を考案	・新材料テラビットメモリの原理と記憶セル構造を実験検討
●調整費充当計画	↔	↔	↔	↔	↔
テラビットメモリ材料・デバイス開発の実施	・有機金属錯体MOCVDによる新規高誘電率薄膜形成技術の確立 ・Si系量子ドットフローティングゲートにおける電荷保持特性の評価	・新規誘電薄膜の基礎物性評価と原子層制御CVDプロセス開発 ・量子ドットの仕事関数制御と電荷保持機能の向上	・キャパシタ信頼性試験と原子層制御プロセスの最適化 ・量子ドットメモリの信頼性試験とデバイス設計パラメータの抽出	・キャパシタのプロセス集積化と信頼性評価 ・高密度立体集積量子ドットの光応答解析	・キャパシタの極微細化と長期信頼性試験 ・光入力量子ドット機能メモリの光感度の向上
	・従来のDRAMメモリセルの面積を半減する4F**2セル構造の案出	・4F**2セル構造の試作を通じ、デバイス試作に伴うプロセス・材料の課題を抽出	・16G(ギガ)ビットDRAMを想定した4F**2セル小規模アレイの試作による、量産試作上の課題抽出	・64GビットDRAMアーキテクチャ・メモリセルの提案とプロセス第0次案の構築	・64GビットDRAMメモリセル向け、絶縁膜材料の開発
ナノバイオセンシング開発の実施	・Siトランジスタ上にSi結合ペプチドを用いて、目的とするタンパク質固定方法を開発	・Siナノワイヤにタンパク質を固定化する界面制御技術の基礎を確立	・ナノワイヤアレイに有機分子を固定化しバイオセンサーを試作、微弱光センサーによる微生物検出	・量子ドット光検出デバイスによる微生物の超高度検出を考案	・光による微生物の超高度バイオセンサーを試作
ナノバイオ融合機能デバイス開発の実施	MEMS利用ナノバイオ融合デバイスの提案と、露光、エッチング技術の開発	MEMS加工技術を用いた高アスペクト、可動構造の形成法	MEMS基盤技術(高アスペクト・可動構造)の確立	MEMS技術を用いた光配線の基礎技術の開発	光配線による信号伝達実効速度1kb/sを目指す
三次元集積ワイヤレス信号処理技術開発の実施	・UWBアンテナアレイによる受信散乱波形のシミュレーション	・広帯域アンテナアレイ及びUWB送受信CMOS回路を設計	・受信波形から3次元誘電率分布を計算するアルゴリズム開発	・UWB信号を受信し3次元画像変換するCMOS回路を設計	・3次元誘電率分布を画像処理するCMOS回路特性を評価
ブレインコンピューティング開発の実施	・3次元集積のために、貫通ビア、磁気、電磁波を複合したインタコネクットのTEG設計	・複合インタコネクットTEG評価およびセンサーインタフェースの構成	・複合インタコネクットによる情報転送技術の特性を検証する	・センサーインタフェース回路TEGの試作評価を行う	・センサーとインタフェースを集積したTEGの設計評価
	・再構成可能な機能メモリを用いたコンピューティングアーキテクチャの基本構成の検討	・再構成可能アーキテクチャの設計、機能メモリの設計、TEG設計	・TEGの評価とメモリベースアーキテクチャ回路の改良	・センサーと学習機能を融合したメモリベースアーキテクチャの基本設計	・メモリベースコンピューティングTEG回路の設計
総計	267 百万円	600 百万円			
うち調整費分	241 百万円	300 百万円			

項目	23年度	24年度	25年度	26年度	27年度
●拠点化構想					
大容量・高速機能メモリ設計・試作	・新材料テラビットメモリの記憶セルの試作	・新材料テラビットメモリの試作評価	・テラビットメモリ試作評価	・テラビットメモリTEG試作評価	・テラビットメモリTEG試作評価
●調整費充当計画					
テラビットメモリ材料・デバイス開発の実施	・キャパシタのDRAMでの性能試験 ・少数フォトンで動作するSi系量子ドット機能メモリの設計・試作・評価	・新規DRAMのトータルプロセスの最適化と超高密度集積化の検討 ・多値動作光入力量子ドット機能メモリの設計・試作・評価	・新規DRAM歩留まり向上、特性ばらつき低減技術の確立 ・Si系量子ドット機能メモリの微細化	・新規DRAM長期信頼性の確保 ・系量子ドット機能メモリの特性ばらつき定量評価	・超高密度DRAMの試作・評価 ・Si系量子ドット機能メモリの超高密度集積化と信頼性確保
	・64GビットDRAM小規模アレーの試作と、デバイス・プロセス技術開発	・1TビットDRAMメモリセル構造の提案とデバイス・プロセス課題の抽出	・1TビットDRAMのセルアレーの試作と、量産技術上の課題の抽出	・1TビットDRAM用メモリセル大規模アレーの試作と、メモリ動作上の課題抽出	・1TビットDRAMを実現するメモリセル・アーキテクチャの実現
ナノバイオセンシング開発の実施	・ウイルス抗体を付加したiナノワイヤTRでバイオセンサーを試作	・スギ花粉、ダニ抗原アレルゲンを固定化し、血清中の抗体バイオセンサーを試作	・医学部と連携し、癌マーカーなどを固定化したバイオセンサーを作成	・各種病気マーカーのセンサーを作成し、多検体の高速診断システムを試作	・多検体の高速診断システムを開発
ナノバイオ融合機能デバイス開発の実施	・光配線による信号伝達速度1Mb/sを目指す	・光配線による信号伝達実効速度1Gb/sを目指す	・MEMS技術をナノバイオ融合デバイスへ応用する基盤技術の開発	・MEMS技術を用いたナノバイオ融合デバイスの試作と動作実証	・MEMS技術を用いたナノバイオ融合デバイスの高度化の研究
三次元集積ワイヤレス信号処理技術開発の実施	・集積化アンテナアレーによる画像化の実証	・生体内の誘電率の異なる位置を画像化するCMOS回路設計	・腫瘍の位置を画像化する性能を評価検証する	・乳ガンの3次元位置を画像化するCMOS回路を評価、特性改善	・3次元位置画像化CMOS回路システム性能を実証する
ブレインコンピューティング開発の実施	・無線通信をも集積したTEG試作で、動作検証	・センサー集積三次元プロトタイプの試作評価	・大容量メモリを三次元集積するTEGの構造設計と試作	・センサーとメモリを集積した三次元ブレインTEGを設計	・センサメモリ集積三次元ブレインTEG試作評価
	・TEG回路の評価とアーキテクチャの改良	・メモリベースコンピューティングのプロトタイプ設計	・大容量メモリスを用いた再構成アーキテクチャのTEG設計	・メモリベースブレインアーキテクチャの検討	・機能メモリベースブレインコンピュータアーキテクチャ設計
総計					
うち調整費分					

(注、調整費分には、間接経費を含む)

10. 諮問委員会

委 員	所 属	備 考
(研究実施者) 牟田 泰三 岡田 光正 岩田 穆 坂本 幸雄 三宅 秀治 岡田 孝夫 杉山 幸宏	広島大学 学長 広島大学 理事・副学長 広島大学大学院先端物質科学研究科 教授 エルピーダメモリ (株) 代表取締役社長 エルピーダメモリ (株) T&D Office Principal Professional (株) 生体分子計測研究所 代表取締役 (株) 生体分子計測研究所 次長	総括責任者 研究代表者
(外部有識者) 石原 宏 大竹 久夫 高橋 雅之 谷口 研二 堀池 靖浩 渡辺 久恒	東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授 大阪大学大学院工学研究科 教授 文部科学省研究振興局基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室 室長 大阪大学大学院工学研究科 教授 (独) 物質・材料研究機構 フェロー (株) 半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長	